

論 文 要 約

Motor Imagery Training with Neurofeedback from the Frontal Pole Facilitated Sensorimotor Cortical Activity and Improved Hand Dexterity

前頭極の運動想起誘導ニューロフィードバック訓練は、
感覚運動野の活動を促進し、手指の巧緻性を増大する

富山大学大学院 生命融合科学教育部
認知・情動脳科学専攻
システム情動科学講座

大田 裕也

〔緒言〕

脳卒中、パーキンソン病ならびにアルツハイマー病など運動リハビリテーションを必要とする中枢神経疾患患者は、過去 25 年間増加し続けており、今後も増加し続けることが示唆されている。これらの患者では、特に上肢や手指の巧緻性運動が障害され、日常生活動作（ADL）の低下により生活の質（QOL）が低下するため、効果的な上肢の巧緻性運動のリハビリテーション法の開発が望まれている。

運動リハビリテーションでは、繰り返し運動学習を行うことにより、運動技能に関与する神経回路を変化させて機能不全に陥った運動機能を改善させることが可能である。特に上肢の巧緻性運動の技能学習では、第一次運動野に関連した神経回路が重要な役割を果たしていることが示唆されている。ニューロフィードバックは、対象者自身の脳活動の情報を対象者に提示して特定の行動や脳機能に関わる脳領域の活動を誘起させる方法であり、近年リハビリテーション分野での応用が始まっている。一方、我々の以前の研究により、手指の巧緻性運動の技能学習では、1) 前頭葉最前部の前頭極の活動が増大し、前頭極活動と技能学習に有意な関連が認められる、および 2) 健常者およびパーキンソン病患者において、前頭極への経頭蓋直流電気刺激（tDCS）により、手指の巧緻性運動能力が増大したことが明らかにされている。本研究では、前頭極のニューロフィードバック訓練法を開発するため、健常人を用いて同方法が、手指の巧緻性運動や第一次運動野の脳血行動態に与える影響を検討した。

〔方法〕

対象は、右利き健常成人 31 名（男性 17 名、女性 14 名）を用いた。被験者を真フィードバック群（ $n=16$ ）と偽フィードバック群（ $n=15$ ）に分け、被験者の頭部に脳血行動態を測定する近赤外分光法（fNIRS）測定用ヘッドキャップおよび送光/受光プローブを装着後、1) 右手指でペグ棒をつまんで穴に入れる課題（ペグ課題）による手指の巧緻性運動能力の測定（訓練前巧緻性運動能力測定）、2) 運動想起訓練（2 週間に 6 回実施）、および 3) ペグ課題による訓練後巧緻性運動能力測定を実施した。運動想起訓練では、i) ペグ課題のビデオを見ながら同動作を一人称的にイメージする訓練（ビデオ誘導運動想起訓練）、および ii) 前方スクリーンに前頭極の活動を提示し、右手指でのペグ課題動作を想起しながら自身の前頭極の活動を増大させる訓練（運動想起誘導ニューロフィードバック訓練）を行った。運動想起誘導ニューロフィードバック訓練では、真フィードバック群には、リアルタイムに被験者自身の前頭極活動を、偽フィードバック群には、被験者自身の脳活動と関連のない偽りの活動をスクリーンに提示した。

課題中の脳活動は、fNIRS により脳血行動態（oxy-Hb、deoxy-Hb、total-Hb 濃度）を計測し、SPM (statistical parametric mapping) 解析を行った。訓練の効果は、1) ペグ課題における訓練前後のペグ移動本数の比（訓練後/訓練前、巧緻性改善率）、および 2) 訓練中の前頭極活動の改善率（訓練第 6 日目/訓練第 1 日目、活動改善率）およびペグ課題における訓練前後の脳活動の比（訓練後/訓練前、活動改善率）により解析した。

〔結果〕

真フィードバック群では偽フィードバック群に比べ、訓練中の前頭極の脳活動、およびペグ課題における手指の巧緻性改善率が有意に高かった。また訓練中の前頭極における活動改善率は、ペグ課題における手指の巧緻性改善率と有意な正相関を示した。訓練後のペグ課題遂行中は、真フィードバック群では左側感覚運動野（運動前野、第一次運動野、第一次体性感覚野）において、偽フィードバック群では補足運動野で脳活動が増大した。これら左側感覚運動野の脳活動は、訓練第5および6日目の前頭極の脳活動と有意な正相関を示した。さらに、ペグ課題における左側第一次運動野の手領域の活動改善率は、手指の巧緻性改善率と有意な正相関を示した。

〔考察〕

1) 前頭極活動に基づくニューロフィードバック訓練

真フィードバック群では偽フィードバック群に比べ、訓練中の前頭極の脳活動、および手指の巧緻性改善率が有意に高く、訓練中の前頭極における活動改善率は、手指の巧緻性改善率と有意な正相関を示した。ニューロフィードバック訓練は、前頭前野、運動前野ならびに補足運動野など特定の脳領域の活動を自己制御できることが報告されている。また我々の以前の研究では、前頭極活動と手指の巧緻性運動の技能学習に有意な関連が認められることを報告している。よって、上肢運動機能のリハビリテーションにおけるニューロフィードバック訓練では、前頭極が重要なターゲットとなることが示唆された。

2) 前頭極のニューロフィードバック訓練が感覚運動野に与える影響

訓練後のペグ課題遂行中は、真フィードバック群では左側感覚運動野（運動前野、第一次運動野、第一次体性感覚野）において脳活動が増大した。左側感覚運動野は右手指の運動を司り、特に第一次運動野は運動制御の中核であり、運動技能学習の主要な役割を担うと報告されている。第一次体性感覚野は運動野へ直接投射し、運動調節に強く関わり、また運動前野は同側第一次運動野の興奮性を高め、運動学習や手指巧緻機能の改善に影響を与えることが報告されている。よって、左側感覚運動野は右手指の運動技能学習において、非常に重要な役割を担うと考えられる。

一方、偽フィードバック群では補足運動野で脳活動が増大した。補足運動野は、刺激と運動反応の新規連携や反応計画の抑制などの認知的制御に関与し、誤反応に対しアラーム信号を発する行動監視システムとして機能していることが報告されている。偽フィードバックでは、ペグ課題の運動想起による正しい前頭極の反応が促進されず、感覚運動野においてペグ動作時の活動とは関連のない活動戦略が誘発された可能性や、視覚入力と運動反応の正しい連携の学習により、補足運動野の活動が増大した可能性が考えられる。

3) 手指巧緻機能改善の神経学的メカニズム

訓練後ペグ課題遂行中の左側感覚運動野の脳活動は、訓練第5および6日目の前頭極の脳活動と有意な正相関を示した。さらに、ペグ課題における左側第一次運動野の手領域の活動改善率は、手指の巧緻性改善率と有意な正相関を示した。我々の以前の研究では、前頭極を含む前頭前野の反応潜時は感覚運動野の反応潜時より短く、前頭前野と感覚運動野の活動は関連していたことを報告している。また前頭前野は感覚運動野に間接投射しており、前頭極の脳活動は新規運動課題の学習時に増大すると報告されている。よって、前頭極の脳活動は、手指巧緻機能改善の中枢である感覚運動野の活動を誘発していると考えられる。

訓練中のこのようなシナプス可塑性の誘導は、長期増強や長期抑制のようなメカニズムやドパミン性神経活動による可能性が考えられる。繰り返しの運動課題における運動学習過程では、長期増強や長期抑制のようなメカニズムを介して、第一次運動野におけるシナプス可塑性を伴い、また前頭極から投射を受ける背外側前頭前野は、同側第一次運動野の興奮性を高めると報告されている。さらに、前頭前野から直接/間接的にグルタミン酸作動性神経の投射を受けるドパミン作動性神経は、前頭前野の同神経活動と関連して活動していると報告されている。よって、前頭極の活動は、感覚運動関連領域において長期増強の誘導を促進するドパミン放出を誘発し、運動技能学習を促進させて手指の巧緻性が改善した可能性が考えられる。

〔結論〕

前頭極活動に基づくニューロフィードバック訓練により、1) 訓練中の前頭極活動、2) 訓練後の左側感覚運動野の活動、および3) 手指の巧緻性が増大した。さらに、1) 訓練中の前頭極の脳活動は、訓練後の左側感覚運動野の活動と、2) 訓練中の前頭極の活動改善率は手指の巧緻性改善率と、および3) 左側第一次運動野の手領域の活動改善率は手指の巧緻性改善率と正相関を示した。一方、これまでの研究により、1) 前頭極は新規課題の学習に関与する、および2) 前頭極を含む前頭前野は、運動前野やドパミン性投射を介して運動野の興奮性を高めることが示唆されている。これらの結果より、同訓練は、前頭極が感覚運動野の活動を促進することにより運動技能学習を促進させて手指の巧緻性を改善したことが示唆された。以上から、本方法では実際の運動を行うことなく、運動機能障害を呈する中枢神経疾患患者の上肢運動機能のリハビリテーションに有用である可能性が期待された。